Application Note

使用全差动放大器进行信号调节

Bill Xu, Georgia Guo, Wendy Wang

摘要

大多数电子工程师都精通使用运算放大器来设计信号调节电路，例如加法器、放大器和有源滤波器。但全差动放大器往往不太常见。实际上，全差分放大器还可以实现信号求和、滤波和电流-电压转换等功能。在某些情况下，使用全差分放大器进行信号处理反而可以简化电路设计，从而降低系统成本。此外，由于差分放大器的固有特性，使用这些放大器的电路自然可提供出色的防噪性能。本文介绍了如何使用全差分放大器进行信号调节。

内容

1 简介.....2
1.1 全差分放大器基础知识.....2
1.2 全差动放大器的优势.....3
2 全差动信号调节电路.....5
2.1 全差动加法器电路.....5
2.2 单端输入全差分加法器电路.....6
2.3 全差动电流-电压转换电路.....7
2.4 全差动有源滤波器电路.....8
3 总结.....10
4 参考资料.....11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: SDAA561
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 简介

全差动放大器 (FDA) 在现代电子系统中的应用越来越广泛；然而，许多工程师将其应用局限于将单端输入信号转换为差动输出信号（通常用于驱动差动输入 ADC），或在差动电路中执行差动放大。实际上，全差动放大器还可以执行信号求和、减法、有源滤波、电流-电压转换等功能。在某些情况下，使用全差动放大器进行信号处理比传统运算放大器具有明显的优势。例如，在医用超声多普勒成像系统中，模拟前端通常包含 1~16 颗 AFE 芯片（如 AFE58JD48、AFE58JD28 或类似芯片），用于接收和解调多普勒频移信号。产生的多普勒输出通常为差动电流信号。系统必须对来自所有模拟前端单元的多普勒信号求和，然后才能将这些信号馈送到精密 ADC 以转换为数字信号并进行后续处理。图 1-1 展示了简化图。

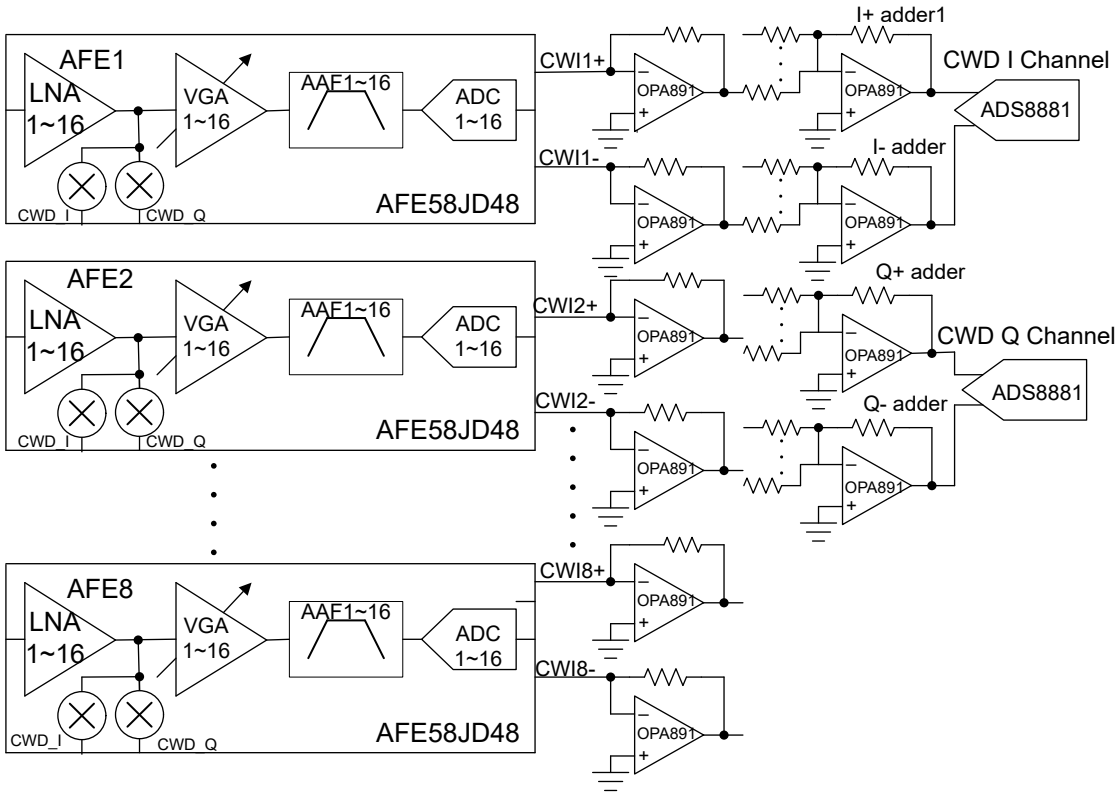


图 1-1. 超声 CWD 成像系统图

传统方法是使用 OPA2891 等标准精密运算放大器，首先将电流信号转换为电压信号，然后使用精密运算放大器对信号求和。使用这种方法时，128 通道超声成像系统需要至少 36 个运算放大器；如果所选的模拟前端只有 8 个接收通道，则所需数量会更高。相比之下，使用全差动放大器进行信号处理时，只需使用两个此类器件即可满足设计要求。因此，适当使用全差动放大器可以简化电路设计、增强系统性能，并降低系统成本和减小 PCB 面积。

1.1 全差分放大器基础知识

图 1-2 显示了一个全差分放大器。与运算放大器不同，全差分放大器有两个输出端子。图 1-3 展示了全差分放大器的典型应用电路。对于差分放大器，输入定义为同相输入端子上的电压减去反相输入端子上的电压，如公式 1 所示。输出定义为同相输出电压减去反相输出电压，如公式 2 所示。输入共模电压定义为同相和反相输入端子处电压之和的一半，如公式 3 所示。同样，输出共模电压定义为非反相和反相输出端子处电压之和的一半，如公式 4 所示。

$$v_{id} = (V_{IN+} - V_{IN-}) \ldots\ldots (1) \tag{1}$$

$$v_{od} = (V_{output+} - V_{output-}) \ldots\ldots (2) \tag{2}$$

$$v_{ic} = \frac{(V_{IN+} + V_{IN-})}{2} \ldots\ldots (3) \tag{3}$$

English Document: SDAA561
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

$$v_{oc} = \frac{\left(V_{output+} + V_{output-}\right)}{2} \ldots\ldots \left(4\right) \quad (4)$$

设 a(f) 为全差动放大器的开环传输功能；则输入电压与输出电压之间的关系如公式 5 所示。

$$v_{od} = a_{(f)} \times v_{id} \left(5\right) \quad (5)$$

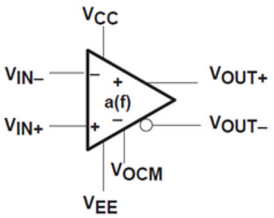


图 1-2. 全差分放大器

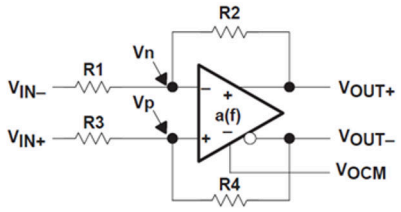


图 1-3. 使用 FDA 的典型放大电路

如图 1-4 所示，对于全差动放大器，内部共模电压设计为在反馈模式下工作；因此，输出共模电压始终等于用户在实际芯片上设置的输出共模电压。请参阅公式 6。

$$V_{OC} = V_{OCM} \ldots\ldots (6) \quad (6)$$

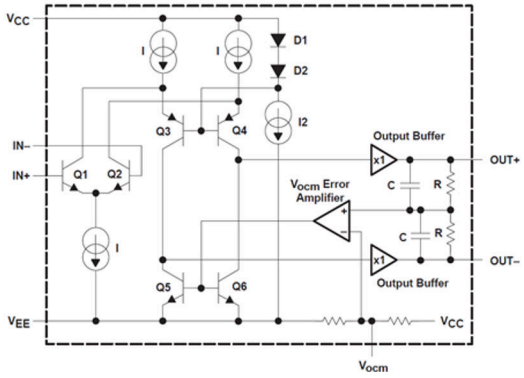


图 1-4. 全差动放大器的简化图

1.2 全差动放大器的优势

全差动放大的主要优势包括：

- 强大的抗干扰能力

设 v_n 为影响全差动电路的干扰；则输出电压为

$$v_{od} = k((v_{in+} + v_n) - (v_{in-} + v_n)) = k(v_{in+} - v_{in-}) \ldots\ldots (7) \quad (7)$$

显然，输出信号中的干扰信号已被消除。

- 在相同的电源电压下，输出电压范围翻倍

假设全差动放大器由对称的双电源供电，由于非反相输入端的输出电压处于最小值时，反相输入端的输出电压处于最大值，反之亦然，因此可以得到：

$$V_{EE} \le V_{output+} \le V_{cc} \ldots\ldots (8) \quad (8)$$

$$V_{cc} \ge V_{output-} \ge V_{EE} \ldots\ldots (9) \quad (9)$$

English Document: SDAA561
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

$$V_{EE} - V_{cc} \le V_{output+} - V_{output-} \le V_{cc} - V_{EE} \ldots\ldots (10) \quad (10)$$

显然，在相同电压条件下，输出电压的动态范围增加了一倍。

- 改善了偶次谐波失真性能

假设输出电压中存在失真，非反相和反相输出端子处的电压由以下公式得出：

$$V_{output+} = k_1 V_{in} + k_2 V_{in}^2 + k_3 V_{in}^3 + \ldots\ldots\ldots (11) \quad (11)$$

$$V_{output-} = k_1 (-V_{in}) + k_2 (-V_{in})^2 + k_3 (-V_{in})^3 + \ldots\ldots\ldots (12) \quad (12)$$

输出电压为

$$V_{od} = V_{output+} - V_{output-} = 2k_1 V_{in} + 2k_3 V_{in}^3 + \ldots\ldots\ldots (13) \quad (13)$$

显然，输出电压中没有偶次谐波失真。

- 低 EMI，低干扰。

由于全差动信号的两条信号线彼此靠近布线并具有相反的相位，因此这两条线路的外部电磁辐射非常小。对其他信号的干扰也较少。

English Document: SDAA561
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 全差动信号调节电路

根据上述简要介绍，我们已经对差动放大器有了基本的了解。与运算放大器一样，反馈效应使得全差动放大器非反相输入端的电压等于反相输入端的电压。该原理可用于确定电路输出与输入之间的关系。此外，在实际设计中，全差动放大器中的两个反馈电阻通常选为相同阻值，以简化计算。

2.1 全差动加法器电路

全差动加法器电路如图 2-1 所示。此处以 THS4551 全差动放大器为例。不过，用户在其具体设计中也可轻松使用其他全差动放大器来实现类似功能。THS4551 是 TI 推荐用于超声多普勒信号处理的全差动放大器，具有低噪声、高带宽和极低输出偏移电压等优势。设 V1 和 V3 表示差动信号 1，V2 和 V4 表示差动信号 2。对非反相端子和反相端子应用基尔霍夫电流定律，可得到公式 14 和 15。

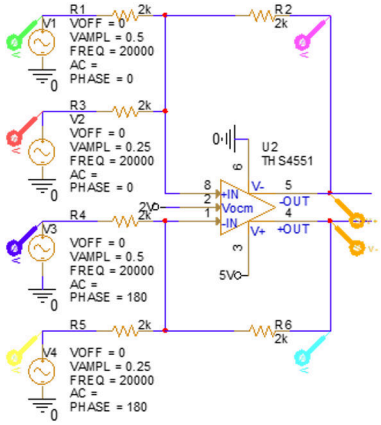


图 2-1. 基于全差动放大器的电压加法器电路

$$\frac{V_1 - V_{IN+}}{R_1} + \frac{V_2 - V_{IN+}}{R_3} = \frac{V_{IN+} - V_{Out-}}{R_2} \ldots\ldots(14) \tag{14}$$

$$\frac{V_3 - V_{IN-}}{R_4} + \frac{V_4 - V_{IN-}}{R_5} = \frac{V_{IN-} - V_{Out+}}{R_6} \ldots\ldots(15) \tag{15}$$

由于反馈作用，$V_{in+}=V_{IN}$。同时，为简化计算，所有电阻器的阻值均相等。由此可得出公式 16。

$$V_{out} = V_{out+} - V_{out-} = (V_1 - V_3) + (V_2 - V_4) \ldots\ldots(16) \tag{16}$$

显然，该电路执行的功能是对输入差动信号求和。仿真结果如图 2-2 所示。输入信号 V1 = 0.5V，V2 = 0.25V，V3 = –0.5V，V4 = –0.25V，预期输出电压为 1.5V。仿真结果显示，输出电压为 1.5V 的正弦波。

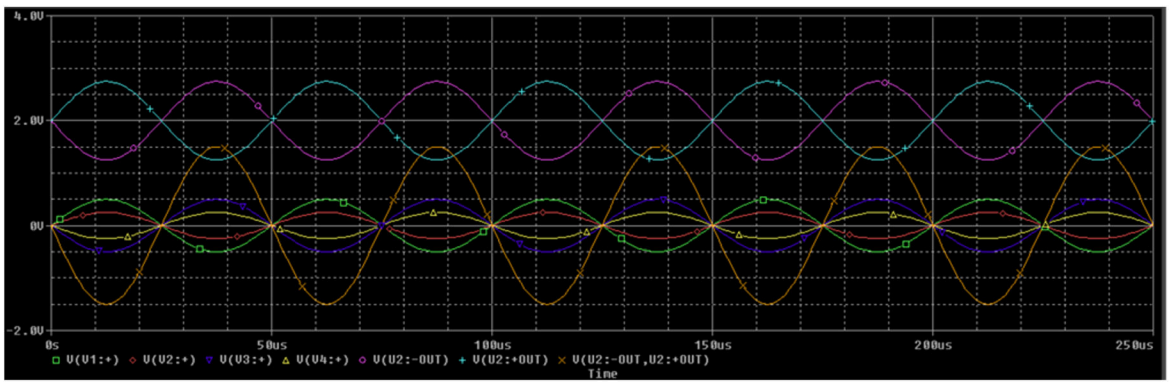


图 2-2. 基于 FDA 的电压加法器的仿真结果

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

设计人员可以轻松推算出在电阻不相等条件下加法器电路的计算公式。推导过程完全类似，此处不再赘述。但请注意，一般来说，差动放大器的非反相和反相端子上的输入电阻以及两个反馈电阻应匹配；这样可以简化公式。如果相应的输入电阻不相等，则所得公式会变得更加复杂。

同样，如果输入信号为电流信号（如图 2-3 所示，其中 I1 和 I3 构成差动信号 1，I2 和 I4 构成差动信号 2），则可以使用基尔霍夫电流定律推导公式 17 和 18。

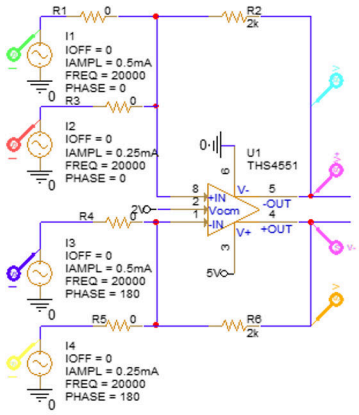


图 2-3. 基于全差动放大器的电流加法器电路

$$V_{IN+} - v_{out-} = (I_1 + I_2) \times R_2 \ldots\ldots (17) \quad (17)$$

$$V_{IN-} - v_{out+} = (I_3 + I_4) \times R_6 \ldots\ldots (18) \quad (18)$$

由于反馈作用，$V_{IN+} = V_{IN-}$。同时，为简化计算，我们设置 $R_2 = R_6$。因此可得出公式 19。

$$v_{out} = (v_{out+} - v_{out-}) = ((I_1 - I_3) + (I_2 - I_4)) \times R_2 \ldots\ldots (19) \quad (19)$$

因此，全差动放大器也可以执行电流求和。仿真结果如图 2-4 和图 2-5 所示。

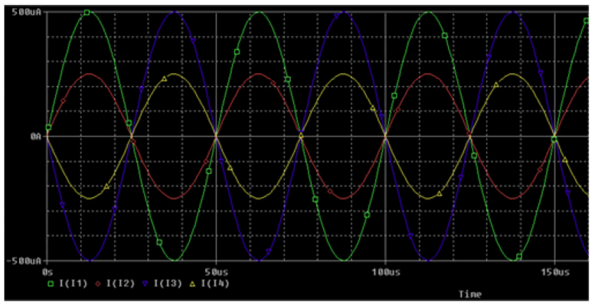


图 2-4. 输入电流

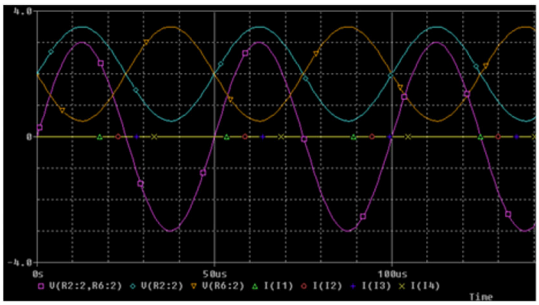


图 2-5. 输出电压

2.2 单端输入全差分加法器电路

在图 4 中，如果 V3 和 V4 设置为 0V，则全差分输入信号变为单端输入信号。在这种情况下，电阻器 R8 和 R11 并联，从而使设计人员能够用单个等效电阻器替换它们。全差分加法器因此变成反相单端信号加法器，如图 2-6 所示。

English Document: SDAA561
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

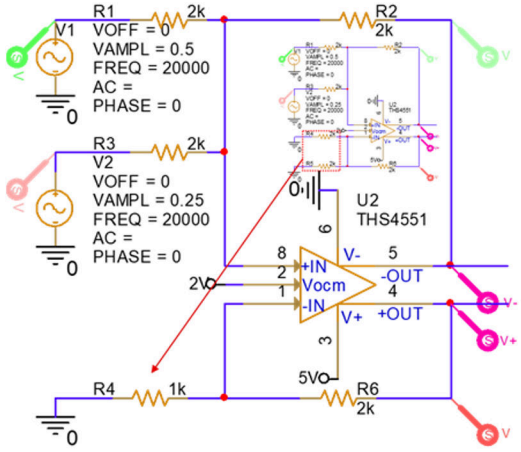


图 2-6. 基于差分放大器的单端信号加法器

电路分析过程与全差分求和电路相同，也可以得到公式 20 和 21。

$$\frac{V_1 - V_{IN+}}{R_1} + \frac{V_2 - V_{IN+}}{R_3} = \frac{V_{IN+} - V_{Out-}}{R_2} \ldots\ldots (20) \quad (20)$$

$$\frac{0 - V_{IN-}}{R_4} = \frac{V_{IN-} - V_{Out+}}{R_6} \ldots\ldots (21) \quad (21)$$

根据公式 20 和 21，可以得出：

$$v_{out} = v_{out+} - v_{out-} = v_1 + v_2 \ldots\ldots (22) \quad (22)$$

仿真结果如下：

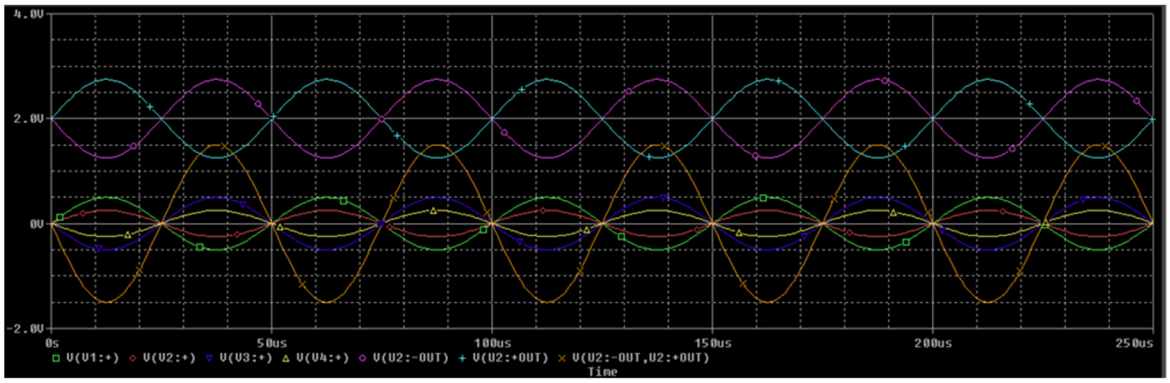


图 2-7. 单端信号加法器的仿真结果

2.3 全差动电流-电压转换电路

在光通信和眼科 OCT 系统中，光电二极管 (PD) 的输出通常是微弱的电流信号；电子系统一般需要将此电流信号转换为电压信号以进行进一步处理。为提高电路灵敏度，设计人员可以采用全差动放大器作为前端电路，将 PD 的输出电流直接转换为差动电压。电路配置如图 2-8 所示。在设计此类电路时，要减小系统误差，需要尽可能减小放大器的偏置电流。THS4567 是一款非常适合此应用的全差动放大器，其偏置电流低至 20pA。

English Document: SDAA561
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

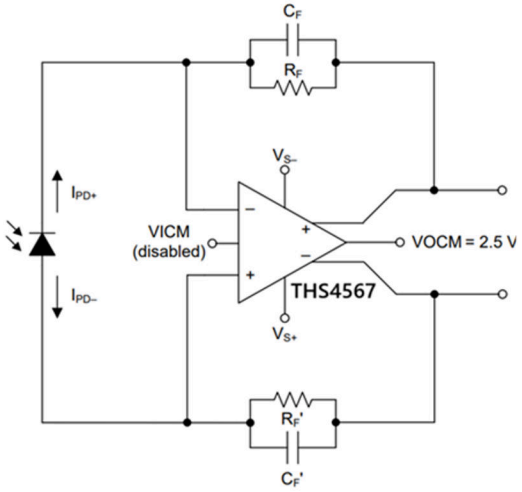


图 2-8. 电路配置

设 PD 的电流为 IPD，则对于非反相端子和反相端子，可以分别得到：

$$v_{IN-} - v_{out+} = -I_{PD} \times R_F \ldots\ldots(23) \quad (23)$$

$$v_{IN+} - v_{out-} = I_{PD} \times R_F \ldots\ldots(24) \quad (24)$$

根据公式 23 和 24，可以得出

$$v_{out} = v_{out+} - v_{out-} = 2I_{PD} \times R_F \ldots\ldots(25) \quad (25)$$

如公式 25 所示，使用差动放大器作为 TIA 电路可以使系统的灵敏度翻倍，这有助于提高信噪比。

2.4 全差动有源滤波器电路

在实际电路设计中，设计人员有时希望将有源滤波功能整合到全差动放大器中，以提高系统的信噪比并滤除噪声和干扰，如图 2-9 所示。

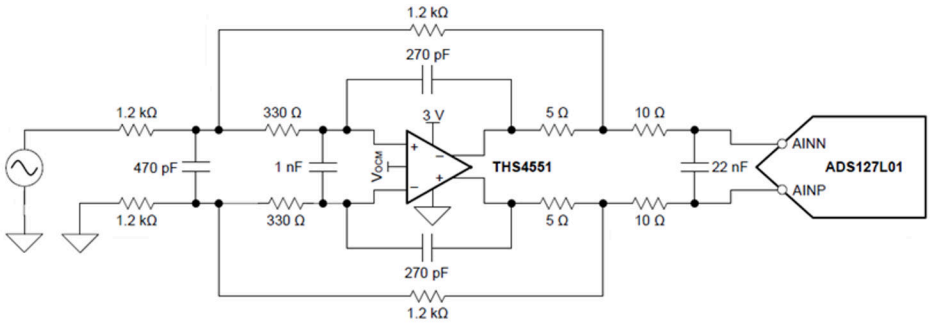


图 2-9. ADS127L01 的 500kHz 多反馈滤波器接口

图 2-9 中所示全差动有源滤波器的设计通常可以分为三个步骤：

- 首先，根据要求，使用辅助软件或其他工具，基于标准运算放大器设计单端滤波器，如图 2-10 所示。
- 然后，创建所设计单端滤波器的两个副本，以对每个差动输入信号进行滤波，如图 2-11 所示。
- 用差动放大器取代标准运算放大器，并加入串联电容器或串联电阻器，如图 2-12 所示。

English Document: SDAA561
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

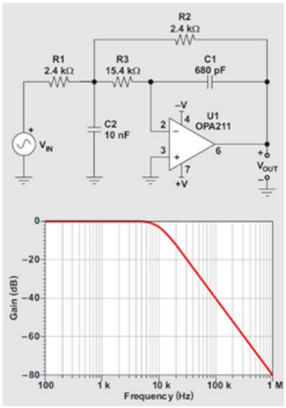


图 2-10. 步骤 1

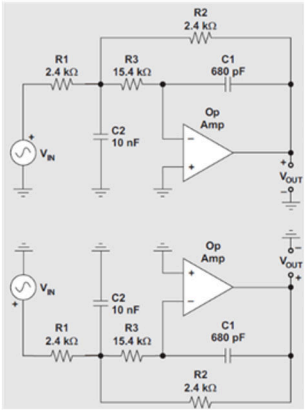


图 2-11. 步骤 2

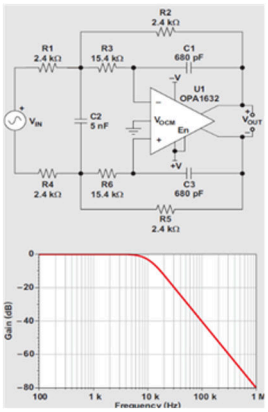


图 2-12. 步骤 3

按照上述步骤操作，即可获得具有所需特性的差动有源滤波器。

English Document: SDAA561
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 总结

本文简要讨论了全差动放大器及其相关的信号处理电路的基本特性。正确使用这些电路可以简化系统设计并提升系统性能。特别是在处理差动信号时，适当应用这些信号处理电路可以简化电路设计、提升性能并降低系统成本。

English Document: SDAA561
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 参考资料

- 德州仪器 (TI)，*全差动放大器* 应用报告
- 德州仪器 (TI)，*适用于 TI 超声波 AFE 的连续波多普勒信号链设计* 应用手册
- 德州仪器 (TI)，*FDA 和差动信号简介* 视频
- 德州仪器 (TI)，*在全差动有源滤波器中使用无限增益、MFB 滤波器拓扑* 模拟应用期刊
- 德州仪器 (TI)，*THS4567* 产品页面
- 德州仪器 (TI)，*OPA2891* 产品页面
- 德州仪器 (TI)，*THS4551* 产品页面

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月